

## Assessment of applicability of Inertial Measurement Units (IMU) in contactless measurements of orientation of main bodies of work machines

JAKUB CHOŁODOWSKI

Wroclaw University of Science and Technology, Mechanical Faculty, The Department of Off-Road Machine and Vehicle Engineering, Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wroclaw, jakub.cholodowski@pwr.edu.pl

**Abstract:** Automation of work machines contribute to improvement in their safety, efficiency and precision. Risk of accidental damage of power cables and water or gas pipes planted underground can be reduced by application of excavation control system with digging depth limiter. Industrial vehicles equipped with operator assistance systems, e.g. dozers and graders fitted with blade positioning systems, can be driven at higher speed than conventional ones, while performing the same duties. What is more, costs of surveyors' and highly experienced operators' salaries can be declined. Eventually, machines with operator assistance systems, e.g. excavator having a grade control system onboard, can be involved in precise slope grading and underwater digging as well as works conducted after dusk.

However, costs of operator assistance system are relatively high, especially when compared with prices of small industrial vehicles, e.g. mini excavators. Cost of said systems could be reduced, for example, if cheaper electronic components, e.g. MEMS sensors, were used.

The article presents a contactless method and system for measurement of industrial vehicle's bodies angular position. The method engages two Attitude and Heading Reference System (AHRS) modules attached to the bodies of the machine. It was verified using two inexpensive AHRS modules, which consisted of STM32 F4 microcontroller and tri-axial, MEMS sensors: a gyroscope, an accelerometer and a magnetometer. The first and the second module were fixed, respectively, to the frame and the bucket of Avant 218 mini loader. Angular position of bucket with respect to vehicle frame was measured. GEMAC IS2A60P20-0 inclinometer and an optical instrument were used as reference devices.

Overall error of examined system was smaller than  $1.05^\circ$ . Further calculations, based on actual dimensions of IHI 35N3 and Komatsu PC750 LC-6 excavators' arms, proved that the examined system is applicable for excavator arm bodies angular position identification. The distortion of bucket tip coordinates estimation using presented system was computed. In case of bigger Komatsu PC750 vertical and horizontal distortion equaled, respectively, 350 mm and 195 mm. In case of smaller IHI 35N3 both errors turned out to be 2.3 times smaller.

Summing up, solution examined in the article fits small industrial vehicles well. Consequently, an idea of a simple, readily available digging depth control system for mini excavators based on presented solution was conceived. To embody the idea, the system should be fitted with two more AHRS modules and operator-system interface which would enable to provide the system with maximum allowable digging depth.

**Keywords:** operator assistance system, bucket positioning, machine bodies orientation measurement, inertial measurement unit (IMU), MEMS sensors application, microcontroller

## Ocena przydatności modułów nawigacji bezwładnościowej w bezdotykowych pomiarach położenia kąтового członów maszyn roboczych

**Streszczenie:** Automatyzacja wybranych funkcji pojazdów przemysłowych prowadzi do podwyższenia bezpieczeństwa i zwiększenia wydajności maszyn. Koszty systemów wsparcia operatorów są wysokie, w szczególności w odniesieniu do cen najmniejszych maszyn. Ich obniżenie można uzyskać przez wykorzystanie do budowy wspomnianych systemów szeroko dostępnych, niedrogich czujników wykonanych w technologii mikromechanicznej.

W ramach artykułu opracowano metodę wyznaczania położenia kąтового członów manipulatora pojazdu przemysłowego z wykorzystaniem modułów nawigacji bezwładnościowej (ang. AHRS). Metodę zweryfikowano posługując się modułami AHRS zbudowanymi na bazie wybranych czujników MEMS. Weryfikację przeprowadzono na przykładzie pomiarów położenia kąтового łyżki miniladowarki względem jej nadwozia. Wykazano przydatność metody w realizacji postawionego zadania, w szczególności w odniesieniu do koparek i ładowarek o najmniejszych gabarytach.

**Słowa kluczowe:** system wsparcia operatora, pozycjonowanie łyżki, pomiar orientacji członów maszyny, moduł nawigacji bezwładnościowej, zastosowanie czujników MEMS, mikrokontroler

## 1. Wstęp

Pełna lub częściowa automatyzacja wybranych funkcji maszyn roboczych jest korzystna. Skutkuje skróceniem czasu, obniżeniem kosztów i zwiększeniem dokładności realizowanych przez pojazdy przemysłowe zadań. Przyczynia się także do poprawy bezpieczeństwa pracy maszyn oraz rozszerza ich możliwości aplikacyjne, pozwalając m.in. na prowadzenie robót w warunkach braku lub ograniczonej widoczności.



Rys.1. równiarka podczas niwelowania terenu [1]

Przykładowo, automatyzacja regulacji położenia i orientacji lemiesza równiarki lub spycharki w korelacji z jej położeniem na placu budowy (rys. 1.) zmniejsza ryzyko wypadku. Operator w trakcie pracy skupia się bowiem głównie na kierowaniu pojazdem. Automatyzacja korekcji nastawy lemiesza prowadzi ponadto do podniesienia wydajności maszyny. Pozwala na:

- zwiększenie prędkości średniej w poszczególnych etapach niwelacji terenu,
- zmniejszenie liczby etapów niwelacji – grubość zdejmowanej w poszczególnych etapach warstwy gruntu optymalizować można tak, aby liczba przejazdów maszyny była minimalna,
- skrócenie czasu przestoju pomiędzy kolejnymi etapami niwelacji – pomiary geodezyjne po każdym z nich nie są konieczne,
- zmniejszenie kosztów zatrudnienia kwalifikowanego personelu, tj. geodety oraz operatora o dużym doświadczeniu potrzebnym w precyzyjnej niwelacji terenu.



Rys. 2. Koparka kształtująca dno zbiornika wodnego [2]



Rys. 3. Koparka podczas kopania głębokiego wykopu o stromych ścianach [3]



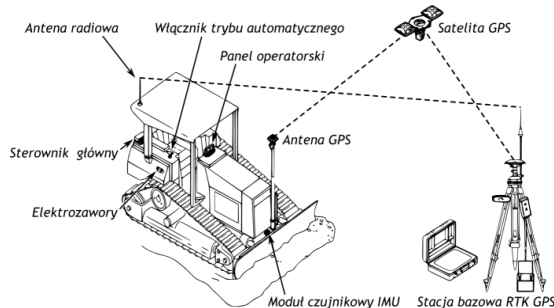
Rys. 4. Koparka w trakcie skarpowania [4]

Wzrost bezpieczeństwa i wydajności pracy przez zastosowanie systemów wsparcia operatora notuje się także w przypadku koparek. Systemy ograniczające głębokość kopania pozwalają na wykonywanie wykopów przez usunięcie minimalnej wymaganej ilości gruntu, a więc przy minimalnym nakładzie energetycznym. Podnoszą ponadto bezpieczeństwo pracy w terenie zurbanizowanym, w pobliżu biegnących pod ziemią instalacji wodno-kanalizacyjnych, elektrycznych igazociągów, narażonych na przypadkowe uszkodzenie podczas prowadzenia robót z użyciem konwencjonalnych maszyn. Systemy kontroli układu manipulatora koparki umożliwiają z kolei realizację precyzyjnych zadań, zarówno w warunkach dobrej jak i ograniczonej widoczności, np. operacji skarpowania, pracy w nocy, kształtowania profilu dna zbiorników wodnych oraz głębokich wykopów o stromych ścianach (rys. 2., 3., 4.).

## 2. Dostępne systemy i sformułowanie problemu

Pośród znanych systemów wspomaganie pracy operatora istnieją rozwiązania wykorzystujące w torze sprzężenia zwrotnego moduły nawigacji bezwładnościowej (ang. AHRS, *Attitude and Heading Reference System*). Moduły te umożliwiają wyznaczenie, metodą bezdotykową, orientacji dowolnego przedmiotu względem globalnego układu odniesienia związanego z wektorami ziemskiego pola grawitacyjnego i magnetycznego. Centralnym elementem każdego modułu AHRS jest jednostka obliczeniowa, która w myśl zaprogramowanego algorytmu oblicza parametry opisujące

orientację obiektu w przestrzeni. Podstawą obliczeń są dane pomiarowe pochodzące z trzech trójosiowych czujników: żyroskopu, akcelerometru i magnetometru tworzących moduł czujników inercyjnych (ang. IMU, *Inertial Measurement Unit*) [5, 6].



Rys. 5. Rozmieszczenie komponentów systemu Topcon 3D-MC<sup>2</sup> do automatycznej korekcji położenia i orientacji lemieszka spycharek [7]

Przykładowo, w systemie Topcon 3D MC<sup>2</sup> (rys. 5.) przeznaczonym do kontroli orientacji i położenia lemieszka spycharek moduł AHRS stosuje się do określania orientacji lemieszka względem placu budowy. Moduł czujnikowy IMU przymocowany jest do lemieszka, zaś jednostkę obliczeniową zintegrowano ze sterownikiem głównym. System uzupełniają anteny GPS – umieszczona na krawędzi lemieszka, odbierająca sygnał z satelity GPS – oraz radiowa – zamontowana na dachu maszyny, odbierająca sygnał zawierający poprawkę dla systemu GPS obliczoną przez stację bazową RTK GPS umieszczoną zdalnie od maszyny. Sygnały odbierane antenami służą do wyznaczenia położenia lemieszka względem placu budowy. Dokładność pozycjonowania lemieszka mieści się w przedziale 10 ... 20 mm. Orientacja i położenie lemieszka są porównywane z wartościami zadanymi projektem elektronicznym, wprowadzonym do systemu za pośrednictwem panelu operatorskiego. W razie rozbieżności sterownik, przez elektrozwory, wymusza odpowiedni ruch lemieszka [7].



Rys. 6. Spycharka Komatsu D61EXi/PXi-23 wyposażona w seryjnie montowany system automatycznej korekcji lemieszka [8]

Moduł AHRS jest również integralną częścią systemu wsparcia operatora instalowanego seryjnie w spycharkach Komatsu D61EXi/PXi-23 (rys. 6.).

W tym przypadku moduł czujnikowy IMU montowany jest do ramy pojazdu i służy do wyznaczenia jej orientacji względem placu budowy. Położenie nadwozia spycharki jest wyznaczane w oparciu o dane GPS odbierane anteną zainstalowaną na dachu maszyny. Pozycja i orientacja lemieszka wyznaczone są na podstawie położenia i orientacji nadwozia oraz sygnałów z czujników wysuwu tłoczyska cylindrów hydraulicznych układu pozycjonowania lemieszka [9, 10].

W przypadku obecnie oferowanych systemów wsparcia operatorów wysoka dokładność pomiaru orientacji narzędzia względem nadwozia i placu budowy, a tym samym jego pozycjonowania w trybie pracy automatycznej, idzie w parze z relatywnie wysoką ceną. Powszechna dostępność mikrokontrolerów oraz czujników wykonanych w technologii mikromechanicznej (ang. MEMS, *Micro Electro Mechanical Systems*) w połączeniu z ciągłym rozwojem teorii estymacji skłania do wykorzystania wspomnianych, dostępnych łatwo i w korzystnej cenie, podzespołów elektronicznych w budowie systemów wsparcia operatorów maszyn roboczych. Niewątpliwie rozwiązanie takie powinno przyczynić się do obniżenia ceny tych systemów. W artykule przedstawiono wyniki testów przydatności korzystnych cenowo modułów AHRS w wyznaczaniu wzajemnej orientacji członów manipulatorów ładowarek i koparek.

### 3. Materiały i metody

#### 3.1. System badany – rozmieszczenie modułów AHRS

Testom poddano autorski system do bezdotykowego pomiaru kąta pomiędzy dwoma dowolnymi członami manipulatora ładowarki lub położenia kąтового wybranego członu manipulatora względem nadwozia pojazdu. System składa się z dwóch prototypowych modułów AHRS (rys. 7c.). W toku testów wykorzystany został do pomiaru położenia kąтового łyżki względem nadwozia ładowarki. Pierwszy z modułów umieszczono nieruchomo względem nadwozia, drugi zaś przymocowano do łyżki obiektu badawczego – ładowarki Avant 218 (rys. 7., 8.).

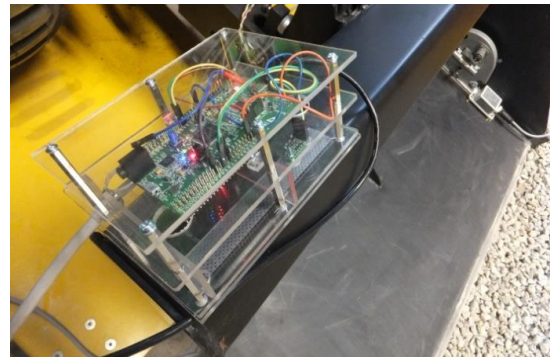


Rys. 7a. Ładowarka Avant 218 podczas badania przydatności modułów AHRS w wyznaczaniu położenia kąтового łyżki względem nadwozia

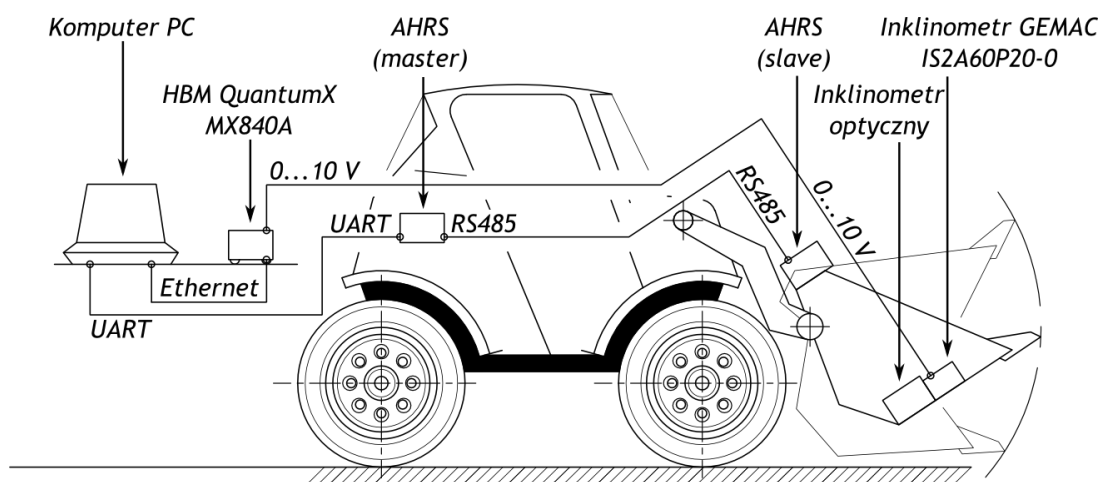




Rys. 7b. Ładowarka Avant 218 podczas badania przydatności modułów AHRS w wyznaczaniu położenia kąowego łyżki względem nadwozia



Rys. 7c. prototypowy moduł AHRS zamocowany do łyżki ładowarki, w tle inklinometry optyczny i elektroniczny wykorzystane w testach jako przyrządy referencyjne



Rys. 8. Rozmieszczenie i sposób połączenia modułów AHRS w system do pomiaru położenia kąowego łyżki względem nadwozia ładowarki

### 3.2. System badany – budowa modułów AHRS

Każdy z modułów AHRS wchodzących w skład systemu (rys. 7c.) składa się z trzech czujników MEMS:

- trójosiowego żyroskopu STM L3GD20 – pomiar prędkości kątowej,
- trójosiowego akcelerometru STM LSM303DLHC – wyznaczanie kierunku przyspieszenia ziemskiego,
- trójosiowego magnetometru STM LSM303DLHC – zintegrowany z akcelerometrem, wyznaczanie kierunku ziemskiego pola magnetycznego.

Jako jednostkę obliczeniową wybrano mikrokontroler STM32F407VGT6. Koszt budowy pojedynczego modułu szacuje się na ok. 250 zł.

Do wyznaczania parametrów opisujących orientację każdego z modułów w układzie odniesienia związanym z wektorami ziemskiego pola grawitacyjnego i magnetycznego zastosowano algorytm szerzej opisany w pracy [5]. Żyroskop w algorytmie tym pełni rolę głównego czujnika, którego sygnał pomiarowy podlega całkowaniu w celu określenia bieżącej orientacji każdego z modułów względem Ziemi. Akcelerometr i magnetometr w początkowej fazie pracy modułów służą do określenia orientacji ich osi czułości względem globalnego układu odniesienia. W dalszym toku pracy sygnały akcelerometru i magnetometru wykorzystuje się zaś do obliczania poprawki na dryft wskazań

żyroskopu. Parametry opisujące orientację każdego z modułów względem Ziemi obliczane są w notacji kwaternionów jednostkowych, iteracyjnie, w nieskończonej pętli. W prezentowanej implementacji częstotliwość odświeżania parametrów reprezentujących orientację każdego z modułów wynosiła ok. 100 Hz.

### 3.3. Kwaterniony jednostkowe w reprezentacji orientacji obiektów w przestrzeni

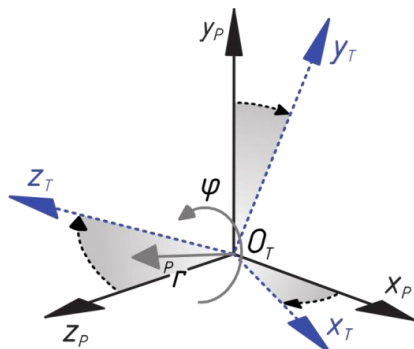
Kwaternionem jednostkowym  $q$  nazywa się cztero-parametrową liczbę zespoloną (1), której moduł wyznaczony zgodnie z zależnością (2) jest równy 1.

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4]^T \quad (1)$$

$$\|q\| = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2} \quad (2)$$

Część rzeczywistą kwaternionu stanowi parametr  $q_1$ , natomiast część urojona – pozostałe. Szersze podstawy teoretyczne dotyczące kwaternionów oraz sposób prowadzenia operacji matematycznych w tej przestrzeni liczbowej szczegółowo opisano w pozycjach [5, 6, 11, 12, 13].

Zastosowanie kwaternionów jednostkowych do reprezentacji orientacji dwóch układów współrzędnych względem siebie zostanie omówione na przykładzie.



Rys. 9. Reprezentacja orientacji przy pomocy kwaternionów jednostkowych:  $\varphi$  – wartość kąta obrotu układ odniesienia P wokół wektora jednostkowego  $r^P$  skutkującego pokryciem się osi układów współrzędnych P i T, za [5]

Każdy z czterech parametrów kwaternionu jednostkowego  ${}^P_T q$  (rys. 9.) opisującego orientację układu współrzędnych indeksowanego literą T w odniesieniu do układu indeksowanego przez P, jest funkcją kąta  $\varphi$  i współrzędnych wektora jednostkowego  $r^P$  (3), wokół którego w pojedynczej operacji należy obrócić układ P o kąt  $\varphi$ , aby osie  $x_P, y_P, z_P$  pokryły się z odpowiadającymi im osiami  $x_T, y_T, z_T$  (4, 5). Wektor  $r^P$  opisany jest współrzędnymi w układzie P [5].

$$r^P = [r_x \quad r_y \quad r_z]^T \quad (3)$$

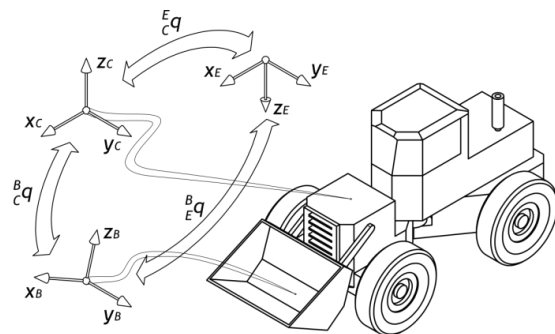
$${}^P_T q = \left[ \cos \frac{\varphi}{2} \quad r^P \sin \frac{\varphi}{2} \right]^T \quad (4)$$

$${}^P_T q = \left[ \cos \frac{\varphi}{2} \quad r_x \sin \frac{\varphi}{2} \quad r_y \sin \frac{\varphi}{2} \quad r_z \sin \frac{\varphi}{2} \right]^T \quad (5)$$

W prezentowanej aplikacji obliczane iteracyjnie parametry reprezentujące orientację każdego z modułów AHRS względem Ziemi stanowią podstawę do wyznaczenia wzajemnej orientacji obydwu modułów, a więc łyżki względem nadwozia ładowarki. W dalszej kolejności obliczany jest kąt obrotu łyżki względem nadwozia. Sposób prowadzenia obliczeń opisano w dalszej części artykułu.

### 3.4. Metoda wyznaczania wzajemnego położenia kątownego członów ładowarki

W ogólności, wiążąc z każdym członem ładowarki po jednym module AHRS, każdy z modułów pozwala wyznaczać orientację związanego z nim członu względem globalnego układu współrzędnych o osiach skorelowanych z wektorami ziemskiego pola grawitacyjnego i magnetycznego. Dysponując wspólnym, globalnym układem odniesienia dla wszystkich członów, możliwym jest wyznaczenie kwaternionów przejścia pomiędzy układami współrzędnych dowolnych dwóch członów manipulatora dla dowolnej chwili czasu pracy ładowarki.



Rys. 10. Ilustracja sposobu wyznaczania kwaternionu jednostkowego transformacji pomiędzy układami współrzędnych nadwozia i łyżki ładowarki

W szczególności (rys. 10.), z punktu widzenia prowadzonych testów, jeśli przez kwaternion:

- ${}^B_E q$  oznaczmy kwaternion opisujący orientację układu odniesienia związanego z wektorami ziemskiego pola grawitacyjnego w odniesieniu do układu współrzędnych związanego z łyżką,
- ${}^E_C q$  oznaczmy kwaternion opisujący orientację nadwozia ładowarki względem wektorów ziemskiego pola grawitacyjnego i magnetycznego,

to kwaternion  ${}^B_C q$  opisujący orientację łyżki względem nadwozia ładowarki wyznacza się przez mnożenie kwaternionów (6).

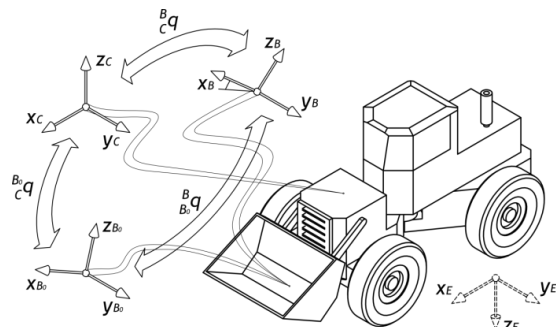
$${}^B_C q = {}^E_C q \otimes {}^B_E q \quad (6)$$

W podany sposób kwaternion  ${}^B_C q$  można wyznaczyć dla dowolnej chwili czasu pracy maszyny. Operacja

mnożenia w przestrzeni kwaternionów zdefiniowana jest zależnością (7):

$$c = a \otimes b = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$c = \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 \\ a_1 b_4 + a_2 b_2 - a_3 b_3 + a_4 b_1 \end{bmatrix}$$



Rys. 11. Ilustracja metody obliczania kąta obrotu dowolnego członu manipulatora płaskiego ładowarki, w szczególności łyżki, względem nadwozia

Jeśli kwaternion  ${}^B_c q$  wyznaczy się w kilku różnych chwilach pracy maszyny, po czym spośród wszystkich wyznaczonych wyodrębni się kwaternion opisujący orientację łyżki względem nadwozia obliczony w początkowej chwili czasu pracy i oznaczać się go przez  ${}^B_0 q$ , to dowolny kwaternion  ${}^B_c q$  dla położenia następnego wyrazić można przez iloczyn (8)

$${}^B_c q = {}^B_0 q \otimes {}^B_c q \quad (8)$$

przy czym  ${}^B_0 q$  jest kwaternionem transformacji pomiędzy układami współrzędnych łyżki w początkowym i późniejszych położeniach kątowych względem nadwozia ładowarki (rys. 11.). Poszczególne współrzędne kwaternionu  ${}^B_0 q$ , zgodnie z przedstawioną wcześniej teorią (5), są opisane zależnością (9).

$${}^B_0 q = \left[ \cos \frac{\theta}{2} \quad r_x \sin \frac{\theta}{2} \quad r_y \sin \frac{\theta}{2} \quad r_z \sin \frac{\theta}{2} \right]^T \quad (9)$$

Jeśli mechanizm manipulatora ładowarki jest mechanizmem płaskim, to spełnione są warunki:

- osie obrotu poszczególnych członów manipulatora są wzajemnie równoległe,
- wszystkie człony manipulatora poruszają się równoległe względem jednej płaszczyzny, w omawianym przypadku stanowiącej płaszczyznę wzdłużną przedniego członu pojazdu,
- oś obrotu dowolnego członu względem nadwozia w układzie odniesienia przedniego członu maszy-

ny nie zmienia swojej orientacji w całym okresie pracy maszyny.

Z powyższego rozumowania wynika, że jeśli mechanizm manipulatora ładowarki jest płaski, to współrzędne wektora  $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  reprezentujące kierunek osi obrotu łyżki względem nadwozia w układzie odniesienia przedniego członu maszyny przyjmują wartości stałe. Kąt obrotu łyżki względem przedniego członu nadwozia jest więc tożsamy z kątem  $\theta$  (9), a zatem obliczyć go można posługując się np. pierwszą współrzędną kwaternionu  ${}^B_0 q$ , korzystając z funkcji arcus cosinus.

Współrzędne kwaternionu  ${}^B_0 q$  dla każdej chwili czasu pracy maszyny można obliczyć rozwiązując układ 4 równań z 4 niewiadomymi postaci (8). Jeśli, dla zwiększenia przejrzystości zapisu, poszczególne kwaterniony zależności (8) zastąpi się, jak pokazano poniżej:

$${}^B_c q \equiv c, \quad {}^B_0 q \equiv a, \quad {}^B_b q \equiv b \quad (10)$$

$$({}^B_c q = {}^B_0 q \otimes {}^B_b q) \equiv (c = a \otimes b) \quad (11)$$

to poszukiwanym kwaternionem jest kwaternion  ${}^B_0 q \equiv b$ . Po uporządkowaniu zależności (7) definiującej operację mnożenia w przestrzeni kwaternionów, w sposób przedstawiony poniżej:

$$c = a \otimes b = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$c = \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_1 b_2 + a_2 b_1 + a_3 b_4 - a_4 b_3 \\ a_1 b_3 - a_2 b_4 + a_3 b_1 + a_4 b_2 \\ a_1 b_4 + a_2 b_2 - a_3 b_3 + a_4 b_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$c = \begin{bmatrix} a_1 b_1 - a_2 b_2 - a_3 b_3 - a_4 b_4 \\ a_2 b_1 + a_1 b_2 - a_4 b_3 + a_3 b_4 \\ a_3 b_1 + a_4 b_2 + a_1 b_3 - a_2 b_4 \\ a_4 b_1 - a_3 b_2 + a_2 b_3 + a_1 b_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

układ równań pozwalający na wyznaczenie współrzędnych kwaternionu  ${}^B_0 q$  w dowolnej chwili czasu można zapisać macierzowo (15, 16).

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \\ a_2 & a_1 & -a_4 & a_3 \\ a_3 & a_4 & a_1 & -a_2 \\ a_4 & -a_3 & a_2 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$c = A b \quad (16)$$

Współrzędne poszukiwanego kwaternionu obliczyć można z zależności (17).

$$A^{-1} c = b \quad (17)$$

Jak widać, macierz A jest macierzą utworzoną ze współrzędnych kwaternionu  $a \equiv {}^B_0 q$  obliczonych w początkowej chwili pracy systemu.



Przebadany w ramach niniejszego artykułu system od bezdotykowego pomiaru położenia kąowego członów manipulatora ładowarki stanowi implementację opisanej w niniejszym punkcie metody obliczeniowej. Powyższy algorytm był realizowany przez jednostkę obliczeniową modułu AHRS skojarzonego z nadwoziem ładowarki (master, rys. 8.) do etapu wyznaczania parametrów kwaternionu  $\frac{E}{C}q$  opisującego wzajemną orientację łyżki i nadwozia ładowarki w kolejnych chwilach pomiaru (6). Obliczone parametry były następnie wysyłane do komputera PC i zapisywane w jego pamięci. Wyznaczenie kąta obrotu łyżki względem nadwozia ładowarki w poszczególnych chwilach pomiaru prowadzono po zakończeniu serii pomiarowej. Do rejestracji danych (obsługi komunikacji za pośrednictwem portu szeregowego) i rozwiązania układu równań (8) skorzystano z pakietu obliczeniowego MATLAB.

#### 4. Możliwości aplikacyjne metody

Zastosowanie systemu działającego w myśl omówionej zasady nie ogranicza się, jak już wspomniano, do wyznaczania położenia kąowego łyżki względem nadwozia pojazdu przyjętego w badaniach. Rozmieszczenie większej liczby modułów AHRS, na pozostałych członach manipulatora, pozwala na wyznaczanie kąta obrotu dowolnego członu względem nadwozia oraz kątów pomiędzy poszczególnymi członami. Co więcej, znając długości członów, możliwym jest obliczenie współrzędnych końcówki łyżki względem dowolnego punktu nadwozia. Opisany sposób wykorzystania modułów AHRS przeniesie można teoretycznie zarówno na ładowarki jak i koparki o dowolnych gabarytach wyposażone w manipulator o kinematyce płaskiej.

Przedstawione na rys. 12., 13. koparki o przestrzennym mechanizmie manipulatora są szczególnie użyteczne w przypadku pracy w trudno dostępnych miejscach. Umożliwiają kopanie wykopów o skomplikowanych kształtach bez konieczności zmiany położenia podwozia. W praktyce są jednak rzadko spotykane.



Rys. 12a. Koparka Komatsu PF55L o przestrzennym mechanizmie manipulatora, z członami połączonymi przez przegub o dwóch stopniach swobody [14]



Rys. 12b. Koparka Komatsu PW170ES o przestrzennym mechanizmie manipulatora z członami połączonymi przez przegub o dwóch stopniach swobody [15]



Rys. 13. Koparka Mecalac 8MCR wyposażona w manipulator przestrzenny z ramieniem łamanym [16, 17]

## 5. Przebieg badań

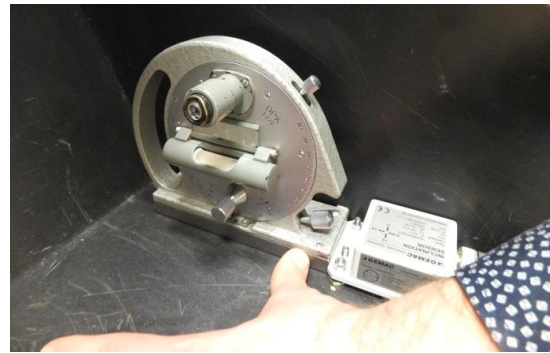
Na czas testów, zgodnie z dotychczasowym opisem, pierwszy moduł AHRS badanego systemu został umieszczony nieruchomo względem nadwozia ładowarki, drugi zaś przymocowano do jej łyżki (rys. 7., 8.). Testy polegały na rejestracji wskazań badanego systemu w miarę zmian położenia kąтового łyżki względem nadwozia.

W artykule zaprezentowano wyniki dwóch serii pomiarowych. W trakcie każdej łyżka ładowarki była zamykana, a następnie stopniowo otwierana. Dodatkowo w serii drugiej badano wpływ dynamicznych ruchów wysięgnika na stabilność wskazań systemu. W serii drugiej pomiędzy niektórymi stopniami otwierania łyżki stopniowo, acz gwałtownie, opuszczano wysięgnik manipulatora. Układ kinematyczny manipulatora wykorzystanej w badaniach ładowarki charakteryzuje się brakiem istotnego wpływu wysokości wysięgnika na orientację kątową łyżki względem nadwozia pojazdu, skąd wniosek, iż wskazanie systemu po zmianie wysokości wysięgnika nie powinno ulec radykalnej zmianie. Częstotliwość próbkowania sygnału pomiarowego pochodzącego z systemu badanego wyniosła ok. 20 Hz.

W trakcie testów wykorzystano dwa urządzenia referencyjne. Przemysłowy inklinometr elektroniczny GEMAC IS2A60P20-0 (rys. 14.) przymocowano nieruchomo, za pomocą magnetycznych nóżek, do dna łyżki. Jego sygnał był próbkowany z częstotliwością 50 Hz i zapisywany na komputerze PC równocześnie z sygnałem pomiarowym systemu badanego. Akwizycja próbek sygnału inklinometru elektronicznego odbywała się z użyciem systemu akwizycji danych HBM QuantumX MX840 A. Ponadto w każdym położeniu kątowym łyżki dokonywano pojedynczego, kontrolnego, pomiaru nachylenia łyżki przy pomocy inklinometru optycznego (rys. 15.).



Rys. 14. Elektroniczny inklinometr przemysłowy GEMAC IS2A60P20-0 zamocowany wewnątrz łyżki ładowarki, jako urządzenie referencyjne wykorzystane podczas badań



Rys. 15. Inklinometr optyczny przyłożony do powierzchni łyżki w trakcie kontrolnego pomiaru pochylenia łyżki w jednym z położen

## 6. Wyniki

### 6.1. Pomiary położenia kąтового łyżki

Rys. 16. ilustruje zmierzone wartości kątów w poszczególnych położeniach łyżki. Wyniki uzyskane przy pomocy systemu badanego korelują z wynikami pomiarów przeprowadzonych przy pomocy inklinometru elektronicznego, a odnosząc się od tabel tab. 1. oraz tab. 2., także instrumentu optycznego.

Na wykresach zauważalna jest duża wrażliwość referencyjnego inklinometru elektronicznego na przeciężenie w trakcie dynamicznych ruchów łyżki i wysięgnika – większa od wrażliwości systemu badanego na ten czynnik. W przypadku obu urządzeń na wykresach obserwuje się charakterystyczne, krótkotrwałe skoki sygnału pomiarowego występujące chwilę po zmianie położenia kąтового łyżki. Szczegółowa ocena własności dynamicznych badanego systemu jest więc trudna. Z wykresów przedstawionych na rys. 16. wynika jednak jasno, że badany system w żadnej sytuacji nie wyznaczył położenia kąowego łyżki z błędem przekraczającym 2 ... 3°.

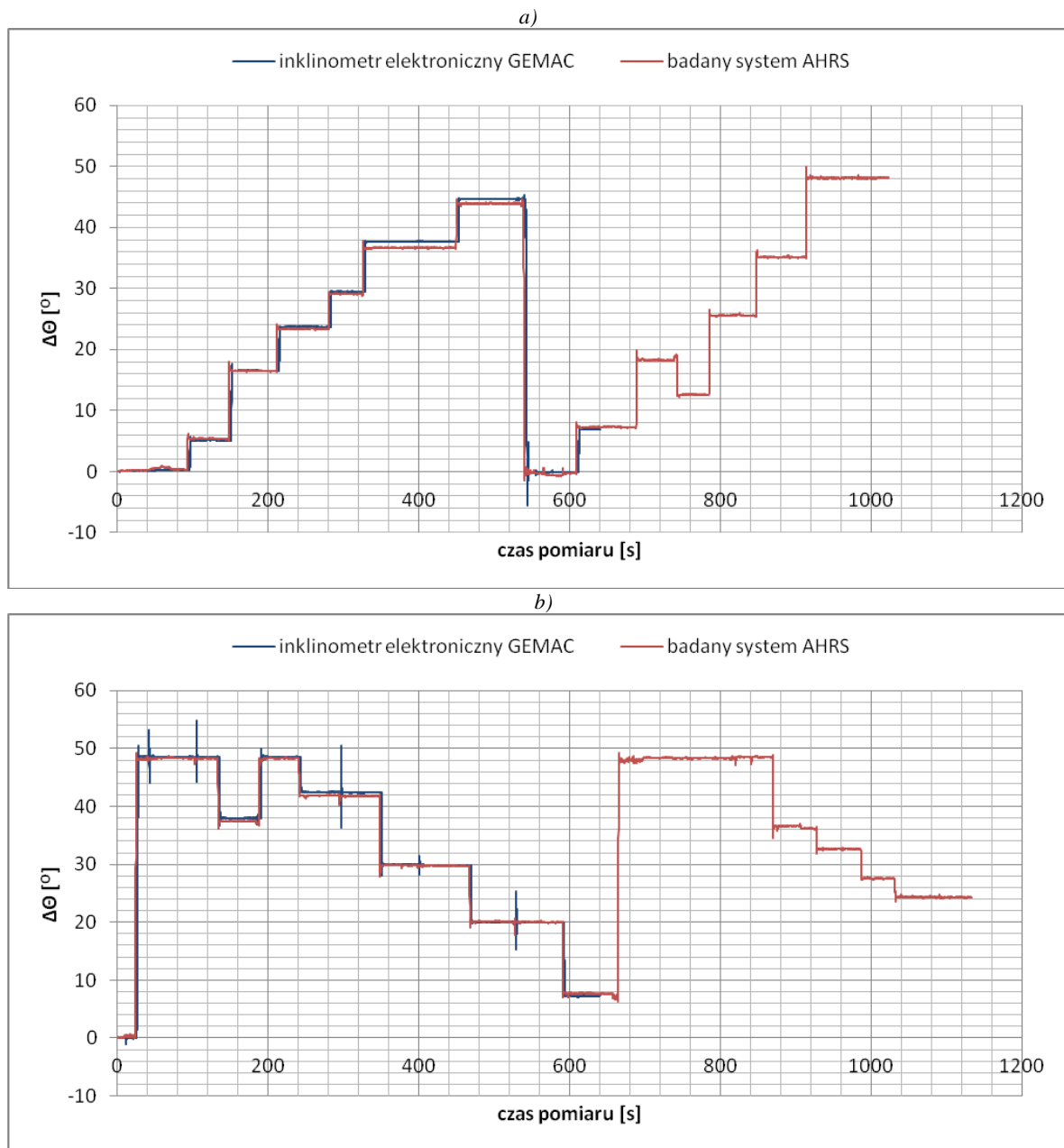
W tabelach tab. 1., 2. szczegółowo przedstawiono rozbieżności pomiędzy wskazaniami systemu badanego, inklinometru elektronicznego i inklinometru optycznego. Podany w dolnej części każdej z tabel błąd całkowity urządzeń elektronicznych obliczano posługując się zależnością (18)

$$\Delta\theta = \varepsilon + 2 \cdot \sigma \quad (18)$$

przy czym:

- $\varepsilon$  jest największą odnotowaną odchyłką wartości położenia kąowego łyżki zmierzonej przyrządem elektronicznym od wyznaczonej przy pomocy inklinometru optycznego,
- $\sigma$  stanowi odchylenie standardowe sygnału w poszczególnych położeniach kątowych łyżki.





Rys. 16. Położenie kątowe łyżki względem nadwozia ładowarki w funkcji czasu pomiaru wyznaczone na podstawie wskazań autorskiego systemu z modułami AHRS, odniesione do wskazań elektronicznego inklinometru przemysłowego GEMAC IS2A60P20-0; a) I seria pomiarowa – bez zmiany wysokości wysięgnika, b) II seria pomiarowa – ze zmianą wysokości wysięgnika

Tab. 1. Wyniki I serii pomiarów położenia kąowego łyżki ładowarki względem nadwozia

Inklinometr optyczny			Inkl. GEMAC IS2A60P20-0			Badany system AHRS				
nr pol.	$\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\varepsilon_{Opt}$	$\sigma$	$\Delta\theta$	$\varepsilon_{Opt}$	$\varepsilon_{GEMAC}$	$\sigma$	
-	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	
1	25.90	0.00	0.00	0.00	0.08	0.35	-0.35	-0.35	0.22	
2	20.75	5.15	5.01	0.14	0.02	5.39	-0.24	-0.39	0.06	
3	9.35	16.55	16.42	0.13	0.02	16.51	0.04	-0.09	0.05	
4	2.37	23.53	23.63	-0.09	0.02	23.39	0.14	0.23	0.05	
5	-3.20	29.10	29.38	-0.28	0.03	29.13	-0.03	0.25	0.04	
6	-11.27	37.17	37.57	-0.40	0.02	36.65	0.51	0.91	0.05	
7	-18.40	44.30	44.56	-0.26	0.02	43.93	0.37	0.63	0.07	
8	26.25	-0.35	-0.21	-0.14	0.02	-0.42	0.07	0.21	0.24	
9	18.92	6.98	6.80	0.19	0.02	7.30	-0.32	-0.50	0.06	
10	7.52	18.38	18.29	0.09	0.02	18.27	0.11	0.02	0.05	
11	13.42	12.48	12.26	0.22	0.03	12.63	-0.14	-0.36	0.05	
12	0.30	25.60	25.74	-0.14	0.05	25.59	0.01	0.16	0.08	
13	-9.67	35.57	36.00	-0.44	0.02	35.12	0.44	0.88	0.05	
14	-22.57	48.47	48.60	-0.14	0.02	48.13	0.34	0.48	0.07	
błąd max.				0.22	0.08	błąd max.		0.51	0.91	0.24
błąd min.				-0.44	0.02	błąd min.		-0.35	-0.50	0.04
<b>błąd calc.</b>				<b>0.60</b>		<b>błąd calc.</b>		<b>1.00</b>	<b>1.40</b>	

Tab. 2. Wyniki II serii pomiarów położenia kąowego łyżki ładowarki względem nadwozia

Inklinometr optyczny			Inkl. GEMAC IS2A60P20-0			Badany system AHRS				
nr pol.	$\theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta$	$\varepsilon_{Opt}$	$\sigma$	$\Delta\theta$	$\varepsilon_{Opt}$	$\varepsilon_{GEMAC}$	$\sigma$	
-	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	[ $^{\circ}$ ]	
1	26.25	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.06	
2	26.25	0.00	0.01	-0.01	0.02	0.11	-0.11	-0.10	0.14	
3	15.25	11.00	10.60	0.40	0.02	10.91	0.09	-0.31	0.04	
4	26.22	0.03	0.02	0.01	0.04	0.04	-0.01	-0.02	0.06	
5	19.83	6.42	6.10	0.32	0.02	6.49	-0.07	-0.39	0.06	
6	19.70	6.55	6.21	0.34	0.02	6.60	-0.05	-0.39	0.05	
7	7.30	18.95	18.64	0.31	0.03	18.52	0.43	0.11	0.08	
8	7.18	19.07	18.74	0.32	0.02	18.62	0.45	0.12	0.05	
9	-2.33	28.58	28.56	0.03	0.03	28.27	0.31	0.29	0.06	
10	-2.42	28.67	28.62	0.05	0.02	28.35	0.32	0.27	0.07	
11	-15.08	41.33	41.31	0.03	0.02	40.69	0.65	0.62	0.07	
12	26.20	0.05	0.01	0.04	0.11	0.10	-0.05	-0.09	0.20	
13	26.28	-0.03	-0.06	0.03	0.03	-0.15	0.11	0.09	0.13	
14	14.20	12.05	11.65	0.40	0.02	11.79	0.26	-0.13	0.09	
15	10.27	15.98	15.62	0.36	0.02	15.70	0.28	-0.08	0.05	
16	5.02	21.23	21.00	0.23	0.02	20.81	0.43	0.19	0.07	
17	1.72	24.53	24.38	0.15	0.02	24.04	0.49	0.34	0.08	
błąd max.				0.40	0.11	błąd max.		0.65	0.62	0.20
błąd min.				-0.01	0.02	błąd min.		-0.11	-0.39	0.04
<b>błąd calc.</b>				<b>0.61</b>		<b>błąd calc.</b>		<b>1.05</b>	<b>1.02</b>	

Przeprowadzone obliczenia dla quasi-statycznych pomiarów nachylenia łyżki potwierdziły wysoką klasę inklinometru GEMAC IS2A60P20-0 zastosowanego jako przyrząd referencyjny. Dla każdej serii pomiarowej obliczono więc błąd całkowity badanego systemu w odniesieniu do wskazań inklinometru elektronicznego

(vide kolumna  $\varepsilon_{GEMAC}$  w tabelach tab. 1. oraz tab. 2.).

Analiza wyników otrzymanych w warunkach quasi-statycznych dla poszczególnych położań łyżki wykazuje, że błąd całkowity badanego systemu, bez względu na przyjęty przyrząd referencyjny, nie przekracza  $1.4^{\circ}$ ,

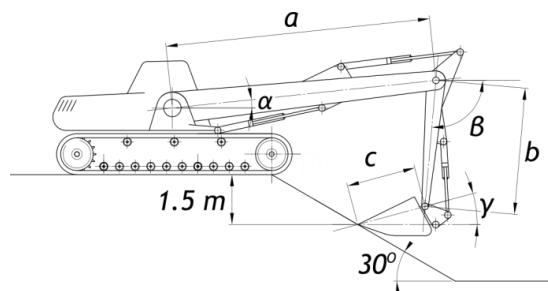
zaś w większości przypadków błąd ten był mniejszy niż  $1.05^\circ$ .

### 6.2. Ilustracja skali błędu systemu

Wpływu błędu pomiaru pochylenia członów manipulatora rzędu  $1.05^\circ$  na błąd wyznaczania współrzędnych końcówki łyżki maszyny roboczej zilustrowano na przykładzie dwóch koparek:

- minikoparki IHI 35N3,
- koparki średniej wielkości Komatsu PC750 LC-6.

W tabeli tab. 3. zestawiono długości poszczególnych członów manipulatorów każdej z nich.



Rys. 17. Wymiary koparek przywołanych w celu ilustracji wpływu błędu obliczania kąta pochylenia członów manipulatora przy pomocy badanego systemu na błąd wyznaczania współrzędnych końcówki łyżki koparki

Tab. 3. Długości członów manipulatora koparek IHI 35N3 oraz Komatsu PC 750 LC-6

			Komatsu PC 750 LC-6	IHI 35N3
Wysięgnik	a	[mm]	8000	2500
Ramię	b	[mm]	3800	1500
Łyżka	c	[mm]	2100	800

Tab. 4. Skrajne wartości współrzędnych końcówki łyżki koparki Komatsu PC750 LC-6 oszacowane przy pomocy badanego systemu do wyznaczania orientacji kątowej członów manipulatora przy założeniu błędu systemu równego  $1.05^\circ$

nr poł.	X				Y			
	$-\Delta$	0.00	$+\Delta$	rozzut	$-\Delta$	0.00	$+\Delta$	rozzut
	mm				mm			
1	5502	5598	5692	189	-1076	-900	-722	354
2	5239	5336	5432	192	-921	-749	-576	344
3	4977	5075	5171	195	-764	-597	-429	335
4	4714	4812	4909	195	-609	-447	-284	325
5	4453	4551	4647	195	-452	-295	-137	315
6	4202	4299	4394	193	-302	-149	4	306
7	3932	4027	4121	188	-141	6	155	296
8	3684	3776	3866	182	8	152	295	287
9	3436	3524	3610	174	158	297	436	278
10	3192	3274	3354	163	308	442	576	269

W ramach rozważań przeanalizowano spodziewany zakres błędów wyznaczenia współrzędnych końcówki łyżki każdej z koparek w trakcie realizacji tej samej trajektorii, tj. profilowania skarpy o wysokości 1.5 m i kącie pochylenia  $30^\circ$  (rys. 17.). Założono, że kąt pochylenia łyżki względem poziomu w trakcie realizacji całej trajektorii jest stały i wynosi  $15^\circ$ . Współrzędne końcówki łyżki wyznaczano z zależności (18, 19).

$$c_x = a \cos \alpha + b \cos \beta - c \cos \gamma \quad (18)$$

$$c_y = a \sin \alpha - b \sin \beta - c \sin \gamma \quad (19)$$

Skrajne wartości współrzędnych końcówki łyżki, potrzebne do obliczenia rozrzutu szacowania położenia końcówki wynikającego z błędu wyznaczenia położenia kątowego poszczególnych członów przy pomocy przebadanego systemu, wyznaczono posługując się zależnościami (20 – 24).

$$c_{x\min} = a \cos \alpha_{\max} + b \cos \beta_{\max} - c \cos \gamma_{\min} \quad (20)$$

$$c_{x\max} = a \cos \alpha_{\min} + b \cos \beta_{\min} - c \cos \gamma_{\max} \quad (21)$$

$$c_{y\min} = a \sin \alpha_{\min} - b \sin \beta_{\max} - c \sin \gamma_{\max} \quad (22)$$

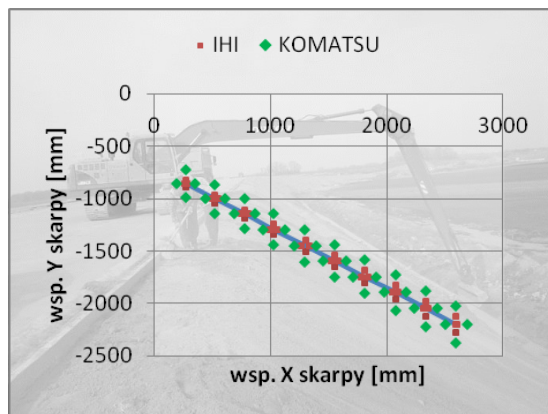
$$c_{y\max} = a \sin \alpha_{\max} - b \sin \beta_{\min} - c \sin \gamma_{\min} \quad (23)$$

Wartości kątów pochylenia poszczególnych członów manipulatora w 10 różnych punktach zadanej trajektorii wyznaczono wykreślnie w programie AutoCAD. Wykorzystano je w obliczeniach zgodnych z zależnościami (20 – 24). Obliczone wartości współrzędnych zebrano w tabelach tab. 4., 5. zaś na rysunku rys. 18. zilustrowano nominalne i skrajne położenia końcówki łyżki obu koparek.



Tab. 5. Skrajne wartości współrzędnych końcówki łyżki koparki IHI 35N3 oszacowane przy pomocy badanego systemu do wyznaczania orientacji kątowej członów manipulatora przy założeniu błędu systemu równego  $1.05^\circ$

nr pot.	X				Y			
	-Δ	0.00	+Δ	rozrzut	-Δ	0.00	+Δ	rozrzut
	mm				mm			
1	2591	2598	2604	13	-2276	-2200	-2124	152
2	2316	2336	2355	39	-2120	-2049	-1978	142
3	2048	2074	2100	52	-1964	-1898	-1831	133
4	1782	1813	1843	61	-1808	-1746	-1685	123
5	1517	1551	1583	66	-1652	-1595	-1538	113
6	1265	1299	1333	68	-1502	-1450	-1398	104
7	994	1027	1060	65	-1340	-1293	-1246	94
8	746	775	805	59	-1190	-1148	-1105	85
9	501	524	546	44	-1040	-1002	-964	76
10	266	273	280	14	-891	-858	-824	67



Rys. 18. Zarys trajektorii ruchu końcówki łyżki koparki jednonaczyniowej podczas skarpowania wraz z nanieśionymi punktami odpowiadającymi skrajnym położeniom łyżki wynikającym z błędu badanego systemu pomiaru położenia kątowego członów manipulatora

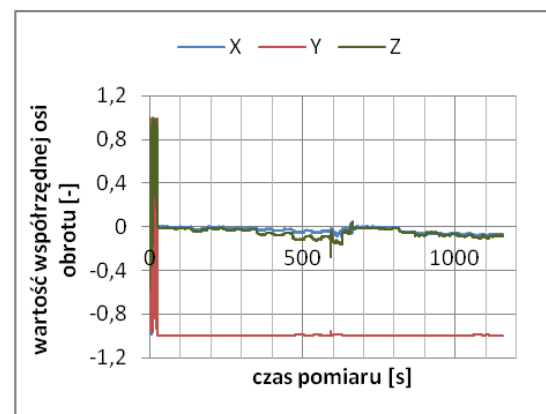
Dla koparki większej maksymalny rozrzut wyników pomiaru położenia końcówki łyżki w kierunku pionowym wyniósł ok. 350 mm, zaś w kierunku poziomym ok. 195 mm. W przypadku minikoparki rozrzut ten był o ponad połowę mniejszy – w kierunku poziomym wyniósł ok. 151 mm, zaś w kierunku pionowym ok. 68 mm.

### 6.3. Współrzędne kierunkowe osi obrotu łyżki

Na rys. 19. przedstawiono współrzędne wektora opisującego kierunek osi obrotu łyżki względem nadwozia ładowarki w trakcie trwania pomiarów, obliczone na podstawie danych uzyskanych przy pomocy systemu badanego w II serii pomiarowej.

W pierwszym położeniu wahania wartości współrzędnych są znaczne. Obserwowana sytuacja jest wytłumaczalna. Jeśli kąt obrotu łyżki w pierwszym położeniu nie zmieniał się względem położenia w zerowej chwili pomiaru, to kąt obrotu był równy  $0^\circ$ . Przeprowadzenie dowolnego obiektu z określonego w to samo

położenie może odbyć się przez obrót o kąt  $0^\circ$  wokół dowolnie wybranej osi. Współrzędne wektora obrotu w takim przypadku pozostają więc ściśle niezdefiniowane. Mogą być dowolne.



Rys. 19. Wykres współrzędnych wektora wyznaczającego kierunek osi obrotu łyżki względem nadwozia w funkcji czasu, przykładowe wyniki obliczone dla II serii pomiarowej

W kolejnych położeniach łyżki odchylenie standardowe poszczególnych współrzędnych nie przekracza 0.037, co w odniesieniu do maksymalnej wartości możliwej do osiągnięcia przez każdą współrzędną, równą 1, stanowi zaledwie 3.7 %. Niewielkie wahania wartości współrzędnych mogą wynikać zarówno z szumów pomiarowych i zakłóceń oddziałujących na układ z otoczenia, jak również z faktycznego braku równoległości pomiędzy osiami obrotu poszczególnych członów manipulatora wykorzystanego w testach.

Reasumując, założenie o niezmienności kierunku osi obrotu łyżki względem nadwozia ładowarki poczynione na etapie syntezy algorytmu pracy badanego systemu uważa się za zasadne. Za jego poprawnością przemawiają zarówno wyniki zaprezentowane na wykresie rys. 19. jak i wyniki pomiarów położenia kątowego łyżki przy pomocy przebadanego systemu, które

dobrze korelują z wynikami pomiarów z użyciem obu przyrządów referencyjnych (rys. 16.).

## 7. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone testy w warunkach quasi-statycznych wykazały przydatność modułów AHRS opartych o dostępne łatwo podzespoły elektroniczne w bezdotykowym wyznaczaniu wzajemnego położenia kąтового członów ładowarki, w szczególności łyżki, względem jej nadwozia. Błąd badanego systemu obliczony zaproponowaną w artykule metodą w trakcie przeprowadzonych testów kształtował się na poziomie  $\pm 1.05^\circ$ . Jak pokazano, błąd tej skali przekłada się na rozrzut pozycjonowania łyżki średniej wielkości koparki:

- w kierunku poziomym ok. 350 mm,
- w kierunku pionowym ok. 195 mm.

Dla maszyn tej klasy podany rozrzut może być trudny do zaakceptowania. Niemniej w przypadku maszyn mniejszych, tzw. miniładowarek i minikoparek, ze względu na znacznie mniejszą długość członów manipulatora, rozrzut wyznaczania współrzędnych końcówki łyżki jest mniejszy. Podczas realizacji założonej trajektorii skarpy przez koparkę IHI 35N3 wyniósł on zaledwie:

- w kierunku poziomym ok. 151 mm,
- w kierunku pionowym ok. 68 mm,

Zaproponowane, korzystne cenowo, rozwiązanie systemu do bezdotykowego pomiaru położenia kąowego członów manipulatorów pojazdów przemysłowych otwiera ciekawą, zdaniem autora, perspektywę doposażania nawet najmniejszych modeli ładowarek i koparek w systemy wsparcia pracy operatora. Doposażenie dowolnej maszyny budowlanej w tego typu system uważa się za ekonomicznie uzasadnione, jeśli koszt systemu nie przekracza 10% ceny maszyny. W przypadku najmniejszych modeli koparek, których ceny katalogowe kształtują się na poziomie 85 ... 100 tys. zł zaprezentowane i przebadane rozwiązanie może być jednym z niewielu, o ile nie jedynym możliwym do zaakceptowania przez potencjalnych nabywców.

Doposażenie nawet najmniejszych maszyn w systemy wspierające pracę operatora, np. system ograniczenia głębokości kopania jest niewątpliwie korzystne. Maszyny tego typu są powszechnie angażowane do robót ziemnych w terenach zurbanizowanych, często w pobliżu kabli energetycznych i telekomunikacyjnych, gazociągów oraz instalacji wodno-kanalizacyjnych biegnących pod ziemią, których przypadkowe uszkodzenie stwarza zagrożenie dla operatora i pozostałych pracowników budowy oraz wydłuża czas i komplikuje przebieg robót.

Realizacja prostego systemu informującego operatora minikoparki o przekroczeniu dozwolonej głębokości kopania na bazie przedstawionego w niniejszym artykule rozwiązania jest wykonalna. Przebadany w ramach artykułu system należałoby doposażyć w dodatkowe dwa moduły AHRS przeznaczone do montażu na członach manipulatora oraz panel operator-

ski do wprowadzania długości członów i maksymalnej głębokości kopania. W najprostszej wersji systemu przekroczenie zadanej głębokości kopania można sygnalizować diodą umieszczoną w polu widzenia operatora lub sygnałem dźwiękowym.

Reasumując, przedstawione w artykule rozwiązanie uważa się za pożyteczne i warte dalszego rozwoju. W dalszych pracach rozwojowych należy przeprowadzić testy systemu w warunkach dynamicznych. Wnikliwiej przebadać zachowanie systemu w trakcie ruchu manipulatora pomiędzy poszczególnymi położeniami łyżki oraz przeprowadzić testy w warunkach polowych, np. podczas wykonywania manewru skrętu nadwozia lub w trakcie jazdy maszyny po nierównościach. W toku badań zauważono niekorzystny wpływ na wskazania systemu dużych obiektów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych. Przykładowo, gdy w pobliżu któregośkolwiek z prototypowych modułów AHRS przez krótką chwilę znajdował się inklinometr optyczny, sygnał pomiarowy systemu zmieniał się, pomimo braku wzajemnego ruchu poszczególnych elementów manipulatora ładowarki. Należy zatem ograniczyć wpływ zmian obrazu zewnętrznego pola magnetycznego na wskazania opracowanego systemu. Może ono bowiem występować choćby w przypadku zmiany konfiguracji manipulatora koparki czy ładowarki. Jednym z najprostszych może być całkowita eliminacja magnetometru z systemu. Powinna się ona jednak odbyć bez wpływu na dokładność szacowania położenia kąowego poszczególnych elementów manipulatora maszyny.

## Literatura / References

- [1] [http://www.tpi.com.pl/uploads/images/galerie/mc/rowniarka-3d-mmgps/0\\_rowniarka\\_3d\\_mmgps\\_g2.jpg](http://www.tpi.com.pl/uploads/images/galerie/mc/rowniarka-3d-mmgps/0_rowniarka_3d_mmgps_g2.jpg), access: 28.04.2015.
- [2] <http://www.my.all.biz/img/my/catalog/7873.jpeg>, access: 03.03.2016.
- [3] <http://www.machineguidance.com.au/Links>, access: 28.04.2015
- [4] <http://www.worldhighways.com/sections/eurofile/features/komatsu-introducing-intelligent-excavator/>, access: 28.04.2015.
- [5] Madgwick S.O.H.: *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*; April 2010, on-line: [http://sharenet-wii-motiontrac.googlecode.com/files/An\\_efficient\\_orientation\\_filter\\_for\\_inertial\\_and\\_inertialmagnetic\\_sensor\\_arrays.pdf](http://sharenet-wii-motiontrac.googlecode.com/files/An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays.pdf), access: 23.03.2014.
- [6] Bekir E.: *Introduction to Modern Navigation Systems*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 2007.
- [7] Topcon Positioning Systems Inc.: *3DMC Reference guide*; April 2010, pp. 8-1 – 8-10, on-line: <http://geoshack.com/wp-content/uploads/2011/06/>

*3DMC-ReferenceGuide-Rev-B.pdf*, access:  
07.05.2015.

- [8] adres obrazu: <https://www.youtube.com/watch?v=0aHTNPsf6j4> , access: 01.03.2016.
- [9] Hayashi K., Shimada K., Ishibashi E., Okamoto K., Yonezawa Y.; *Development of D 61EXi/PXi-23, Bulldozer with automatic control system of work equipment*; Komatsu Technical Report, no. 166, vol. 59, 2013, on-line: <http://www.komatsu.com/CompanyInfo/profile/report/pdf/166-E02.pdf>, access: 07.05.2015.
- [10] Komatsu Ltd.; *Intelligent Machine Control*; Komatsu Newsletter, no. 11, Tokio, Japan June 2013, on-line: [http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201306/Views\\_No11\\_ICT.pdf](http://www.komatsu.com/CompanyInfo/views/pdf/201306/Views_No11_ICT.pdf), access: 28.04.2015.
- [11] Diebel J.; *Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors*; Stanford University, Stanford 2006.
- [12] Farrell J.A.; *Aided navigation, GPS with High Rate Sensors*; The McGraw-Hill Companies, USA 2008, Appendix D, pp. 501 - 513.
- [13] Kuipers, J.B.: *Quaternions and rotation sequences. Geometry, Integrability and Quantization*, Varna, Bulgaria, 1 – 10 September 1999. Coral Press, Sofia 2000, pp. 127 - 143.
- [14] <http://www.bauforum24.biz/forums/topic/7519-komatsu-pf-55-l/>, access: 06.05.2015.
- [15] <http://forum.dhscdiecast.com/default.aspx?g=posts&t=133570> , access: 06.05.2015.
- [16] <http://www.mecalac.com/de/der-mecalac-aus-leger-fuer-bagger.html>, access: 12.01.2016.
- [17] <http://www.mecalac.com/en/machine/8mcr-rr.html> , access: 12.01.2016.